Conférence finale / Conferenza finale — Aoste, 04.11.2026

Conception et réalisation d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG)

Progettazione e realizzazione di un sistema di impermeabilizzazione con geomembrana (SIG)





Guillaume STOLTZ — INRAE, UMR RECOVER

avec / con H. TAHIR[1], N.AKEL[1], G. VEYLON[2], L. PEYRAS[1]

[1] INRAE, Aix Marseille Université, UMR RECOVER · [2] Université Gustave Eiffel

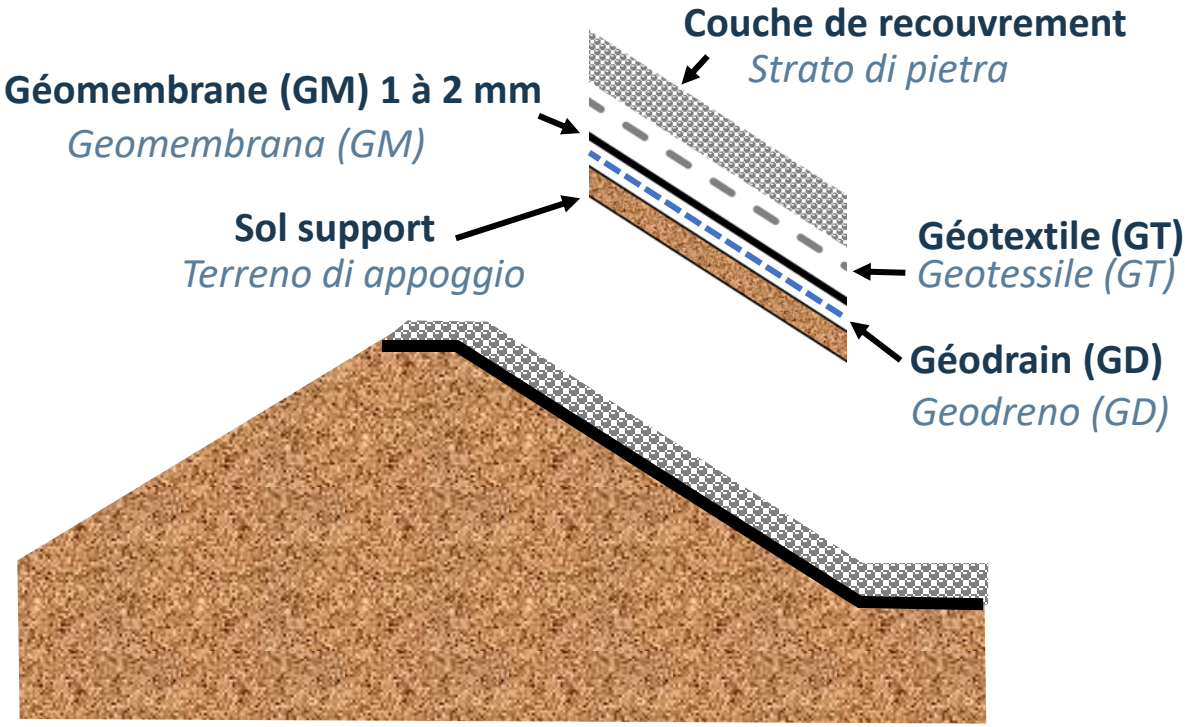
Interreg — Cofinancé par l'Union Européenne — Cofinanziato dall'Unione Europea

France – Italia ALCOTRA

BECCA

Dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) dans les retenues d'altitudes

Sistema di Impermeabilizzazione a Geomembrana (SIG) in dighe in alta quota

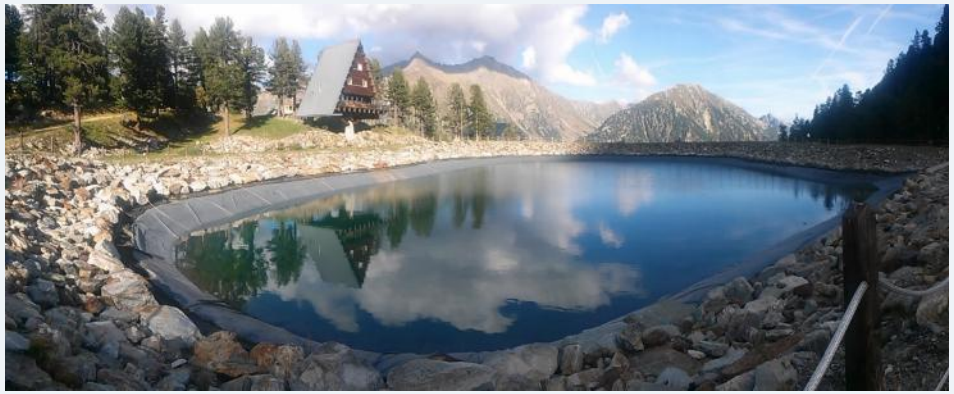


> 300 (ICOLD database 2014)

barrages dans le monde étanchés par géomembrane

grandi dighe nel mondo impermeabilizzate con geomembrana

DEG semi recouvert / *SIG strato di pietra nella parte superiore della diga*



Retenue Weissmatten (photo G.Stoltz) *Dighe in alta quota Weissmatten (Foto G.Stoltz)*

DEG entièrement recouvert / *SIG strato di pietra che copre l'intera diga*



Retenue Les Ménuires (photo G.Stoltz) *Dighe in alta quota Les Ménuires (Foto G.Stoltz)*

Problématique des DEG dans les retenues d'altitudes

Problema di SIG in dighe in alta quota

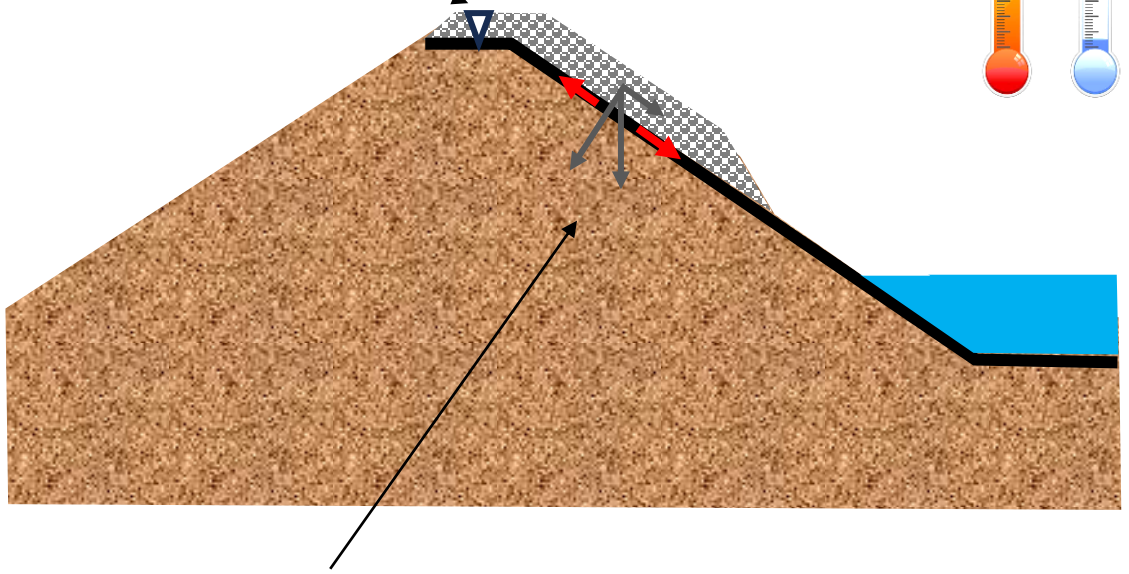


Fissure en tête de talus (photo M.Boutry)

Crepa in cima al pendio (Foto M.Boutry)

Rupture (fissure) en tête de talus

Fallimento (crepa) in cima al pendio





Rayonnement UV et cycles de température

Radiazione UV e cicli di temperatura

Effort induits par la couche de recouvrement : mise en traction de la GM

Stress indotto dallo strato di ciottoli : messa in trazione della GM



GM exposée (photo G.Stoltz)

GM esposta al sole (Foto G.Stoltz)

Effets thermiques sur la géomembrane d'un DEG

Effetti termici sulla geomembrana di un SIG

Interreg France – Italia ALCOTRA

Cofinancé par l'Union Européenne
Cofinanziato dall'Unione Europea

BECCA

Une GM a un comportement visqueux

Una GM presenta un comportamento viscoso

→ Impact sur les essais de laboratoire
→ Impact sur le comportement in-situ
→ *Impatto sulle prove di laboratorio*
→ *Impatto sul comportamento in situ*

Le climat se réchauffe

Il clima si sta riscaldando

→ Canicules plus intenses
→ Canicules plus fréquentes
→ *Ondate di calore più intense*
→ *Ondate di calore più frequenti*

Vide normatif

Vuoto normativo

→ Sur les normes d'essais
→ Sur les normes de dimensionnement
→ *Sulle norme di prova*
→ *Sulle norme di dimensionamento*

Sur une pente de barrage, la géomembrane est sollicitée lentement, pendant des décennies, dans un contexte de changement climatique
Su un pendio di una diga, la geomembrana è sollecitata lentamente, per decenni, in un contesto di cambiamento climatico

WP 3.2 — Etudes des effets thermiques sur les DEG

Studi sugli effetti termici sui SIG

Interreg France – Italia ALCOTRA

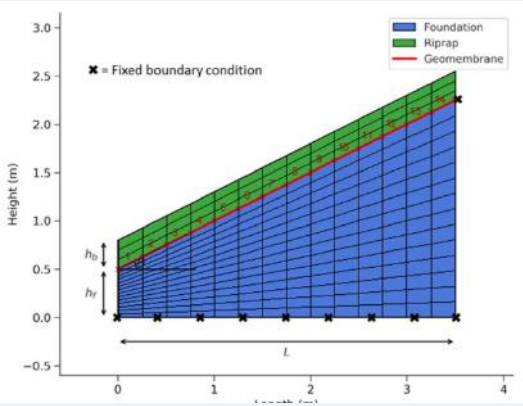
BECCA

DEG recouvert ou semi recouvert

SIG ricoperto o parzialmente coperto



- Evaluation des efforts dans la GM suite à des cycles de température
  Valutazione degli sforzi nella GM in seguito a cicli di temperatura
- Essais mécaniques dans une enceinte contrôlée en température
  Prove meccaniche in un ambiente a temperatura controllata
- Modélisation numérique
  Modellazione numerica





DEG exposé ou semi recouvert

SIG esposto o parzialmente coperto



- Evaluation des effets combinés mécanique, rayonnement et temperature sur la durabilité d'une GM
  Valutazione degli effetti combinati di meccanica, radiazione e temperatura sulla durabilità di una GM
- Programme expérimental de vieillissement dans une enceinte UV
  Programma sperimentale di invecchiamento in una camera a raggi UV
- Essais mécaniques et dosage en plastifiants à différents temps de vieillissement
  Prove meccaniche e dosaggio dei plastificanti a diversi tempi di invecchiamento







Du laboratoire vers des recommandations pratiques

Dal laboratorio verso raccomandazioni pratiche

Interreg France – Italia ALCOTRA

BECCA

1 Laboratoire

Laboratorio

→ Essais mécaniques de traction unidirectionnelle à différentes vitesses et à différentes températures

→ Essais mécaniques de traction unidirectionnelle sur éprouvettes vieillies en laboratoire

→ Prove meccaniche di trazione unidirezionale a diverse velocità e a diverse temperature

→ Prove meccaniche di trazione unidirezionale su provini invecchiati in laboratorio

2 Loi de comportement et modèle numérique

Legge di comportamento e modello numerico

→ Détermination d'une loi qui régit le module de déformation de la GM en fonction de la température et des effets visqueux

→ Determinazione di una legge che governa il modulo di deformazione della GM in funzione della temperatura e degli effetti viscosi

3 Recommandations pour les essais et pour le dimensionnement

Raccomandazioni per le prove e per il dimensionamento

→ Proposition de faire évoluer normes d'essais et de dimensionnement

→ Révision de guides de recommandations existants

→ Proposta di evoluzione delle norme di prova e di dimensionamento

→ Revisione delle guide di raccomandazione esistenti

L'objectif est que les recommandations à écrire aux travers d'articles scientifiques servent pour la conception et la réhabilitation d'ouvrages

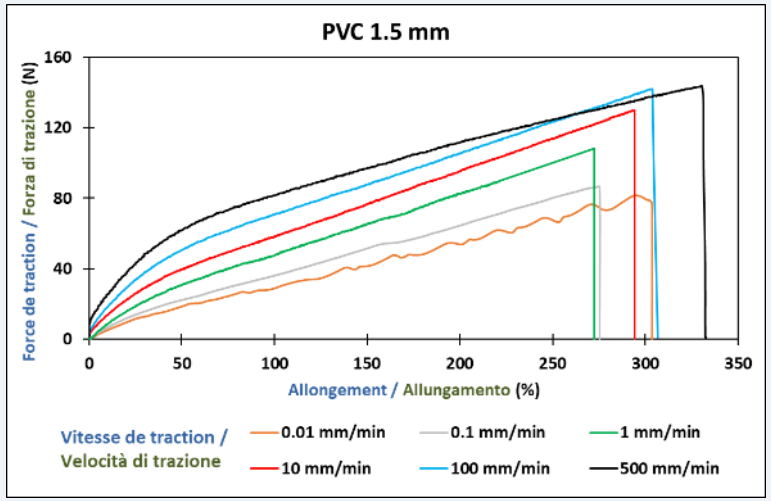
L'obiettivo è che le raccomandazioni, da redigere attraverso articoli scientifici, servano per la progettazione e la riabilitazione di opere

Effets visqueux d'une GM

Effetti viscosi di una GM

RÉSULTAT 1 · SEPT GÉOMEMBRANES · CINQ DÉCADES DE VITESSE / *RISULTATO 1 · SETTE GEOMEMBRANE · CINQUE DECADI DI VELOCITÀ*

Essai de traction unidirectionnelle / *Test di trazione unidirezionale*



GM PVC, 1,5 mm : force de traction en fonction de l'allongement, à six vitesses d'essai
GM in PVC, 1,5 mm : forza di trazione in funzione dell'allungamento, a sei velocità di prova

Sept produits, du PEHD et du PVC à l'EPDM et au bitumineux, ont été sollicités à six vitesses, de 0,01 à 500 mm/min. Plus la vitesse de déformation est petite, plus la déformabilité est grande.
Sette prodotti, dall'HDPE e dal PVC all'EPDM e al bituminoso, sono stati sollecitati a sei velocità, da 0,01 a 500 mm/min. Più la velocità di deformazione è bassa, maggiore è la deformabilità.

$$F = A \cdot \log (v / v_0) + B$$

La resistance à la traction suit une loi logarithmique en vitesse d'essai
La resistenza a trazione segue una legge logaritmica nella velocità di prova

+ 586 %

augmentation de la rigidité de la géomembrane PVC entre 0,01 et 500 mm/min
aumento della rigidezza della geomembrana in PVC tra 0,01 e 500 mm/min

Dans un ouvrage réel, les déformations se développent bien plus lentement que dans tout essai normalisé : la résistance normalisée mesurée en laboratoire est surestimée
In un'opera reale, le deformazioni si sviluppano molto più lentamente che in qualsiasi prova normalizzata: la resistenza normalizzata misurata in laboratorio risulta sovrastimata

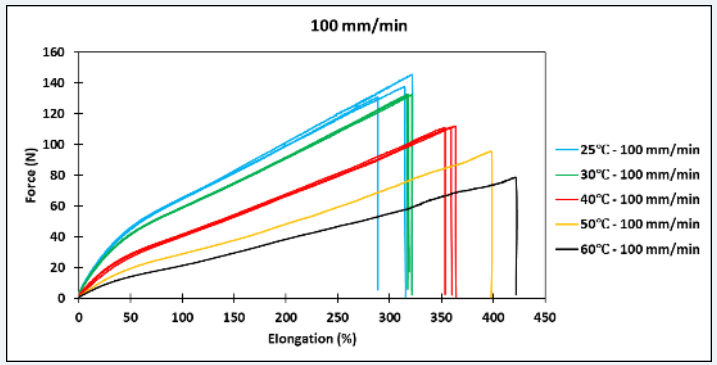
Effets visqueux – effets thermiques : une équation unique

Effetti viscosi – effetti termici: un'equazione unica

RÉSULTAT 2 · PVC-P · 24 CONDITIONS D'ESSAI / *RISULTATO 2 · PVC-P · 24 CONDIZIONI DI PROVA*

SOUMIS · EN COURS D'ÉVALUATION

Une géomembrane PVC-P a été testée en chambre thermique à 30, 40, 50 et 60 °C et à six vitesses.
La température et la vitesse agissent comme deux multiplicateurs indépendants sur une seule courbe de référence.
Una geomembrana in PVC-P è stata provata in camera termica a 30, 40, 50 e 60 °C e a sei velocità.
Temperatura e velocità agiscono come due moltiplicatori indipendenti su un'unica curva di riferimento.



PVC-P à 100 mm/min et à 25, 30, 40, 50 et 60 °C
PVC-P a 100 mm/min e a 25, 30, 40, 50 e 60 °C

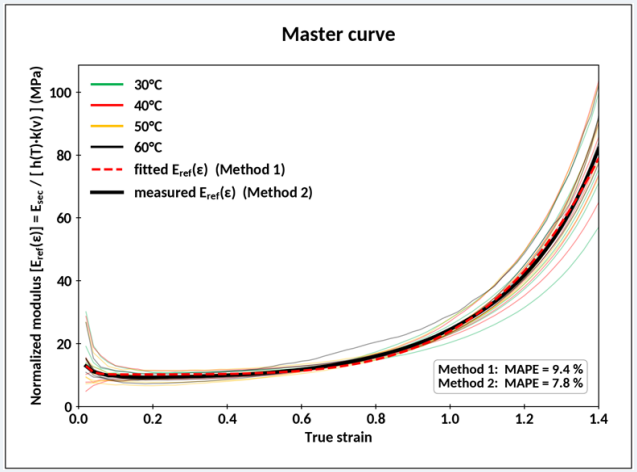
$$E_{sec}(\varepsilon, T, v) = E_{ref}(\varepsilon) \cdot e^{-\alpha\,(T - Tref)} \cdot (v/v_{ref})^{n}$$

$\alpha = 0.0325\ °C^{-1}$ · $n = 0.1004$ · ref. 30 °C, 1 mm/min

La rigidité est divisée par deux tous les 21 °C
La rigidezza si dimezza ogni 21 °C

La rigidité augmente de 26 % par décade de vitesse
La rigidezza aumenta del 26 % per decade di velocità

Une courbe et deux nombres reproduisent les 24 conditions, $R^2 = 0,94$
Una curva e due numeri riproducono le 24 condizioni, $R^2 = 0,94$

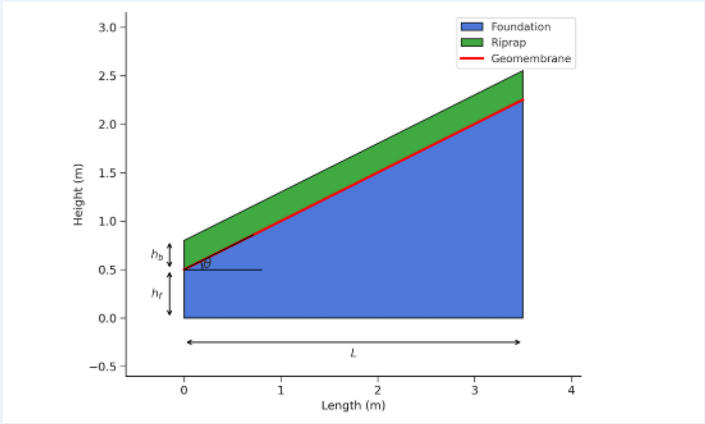


L'équation est volontairement compacte ce qui permet de l'intégrer directement dans un code de calcul, au lieu d'un tableau de mesures à trois entrées.
L'equazione è volutamente compatta, il che consente di integrarla direttamente in un codice di calcolo, anziché utilizzare una tabella di misurazioni a tre ingressi

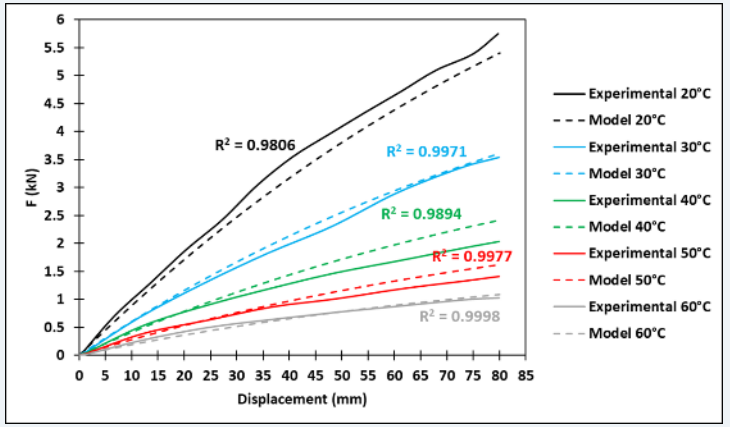
Modèle numérique de l’ouvrage complet

Un modello numerico dell’intera opera

RÉSULTAT 3 · FLAC2D · DIFFÉRENCES FINIES / *RISULTATO 3 · FLAC2D · DIFFERENZE FINITE*



Géométrie de la pente modélisée
Geometria del pendio modellato



Modèle et expérience, de 20 à 60 °C
Modello e sperimentazione, da 20 a 60 °C

Ce que contient le modèle
Cosa contiene il modello

→ DEG recouvert sur une pente 2H:1V (26,6°) : support, GM et enrochement
→ interface de frottement au-dessus et au-dessous de la GM
→ Un SIG coperto su un pendio 2H:1V (26,6°): supporto, geomembrana e pietrame
→ Interfaccia di attrito al di sopra e al di sotto della GM

La physique ajoutée
La fisica aggiunta

→ Rigidité non linéaire dépendante de la température, plus la dilatation et la contraction thermiques de la GM, avec des cycles imposés entre 20 et 60 °C
→ Rigidezza non lineare dipendente dalla temperatura, più la dilatazione e la contrazione termica della GM, con cicli imposti tra 20 e 60 °C

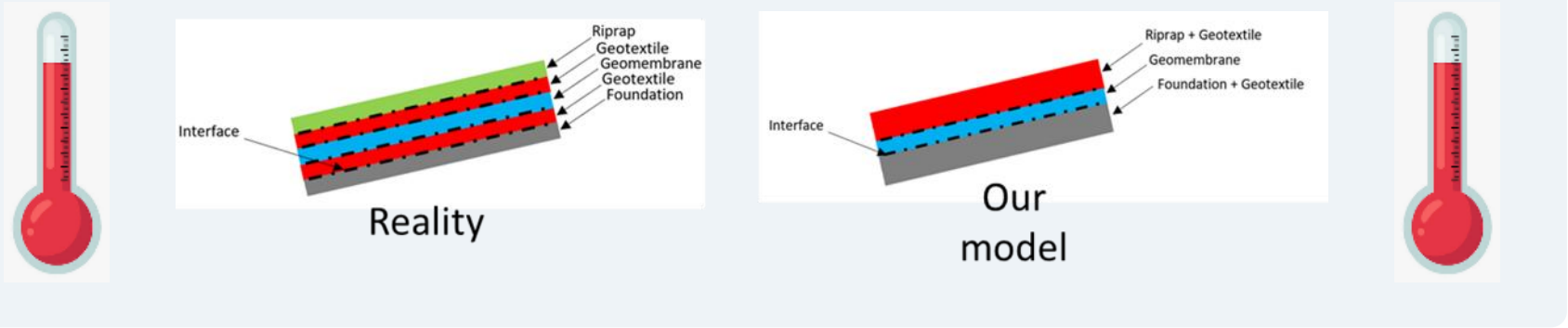
Vérifié sur des essais de traction
Verificato tramite prove di trazione

→ Le modèle reproduit d’abord les essais de traction de laboratoire de 20 à 60 °C avant d’être appliqué à l’échelle de l’ouvrage
→ Il modello riproduce dapprima le prove di trazione di laboratorio da 20 a 60 °C prima di essere applicato alla scala dell’opera

La température pilote la déformation de la GM ; l'interface pilote l'effort de traction

La temperatura determina la deformazione della GM; l'interfaccia determina lo sforzo di trazione

RÉSULTAT 3 · CE QUE MONTRE LE MODÈLE / *RISULTATO 4 · CIÒ CHE MOSTRA IL MODELLO*



Une hausse de la température induit un allongement de la GM
Un aumento della temperatura determina un allungamento della GM

→ Elle doit s'allonger bien davantage pour reprendre la même charge.
→ Deve allungarsi molto di più per sopportare lo stesso carico.

+ 358 %

de déformation en plus dans la géomembrane en crête entre 20 et 60 °C
di deformazione in più nella geomembrana al coronamento tra 20 e 60 °C

C'est l'interface inférieure qui gouverne la stabilité
È l'interfaccia inferiore a governare la stabilità

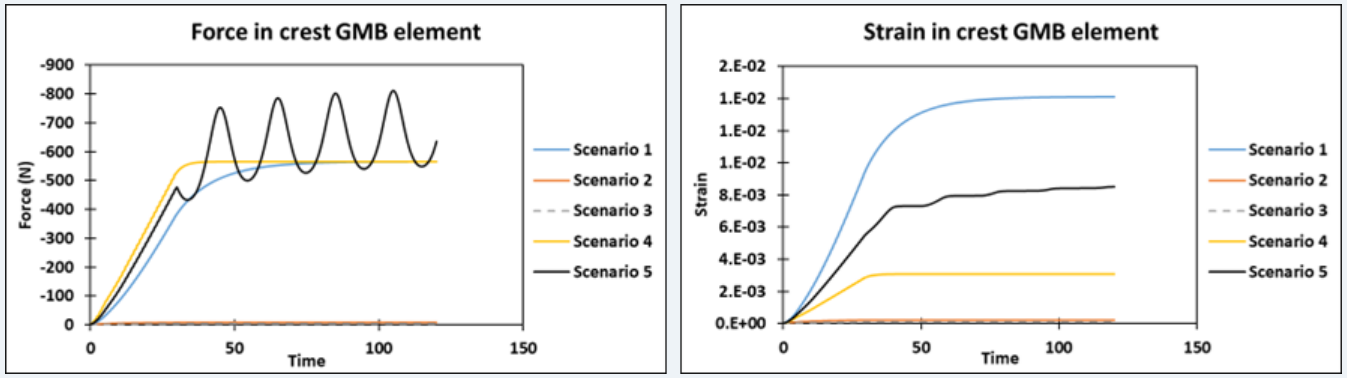
→ La configuration critique est un angle de frottement sous la géomembrane plus faible que celui au-dessus, et plus faible que l'angle de la pente
→ La configurazione critica è un angolo di attrito sotto la geomembrana inferiore a quello superiore e inferiore all'angolo del pendio

Accumulation de déformation après cycles thermiques

Accumulo di deformazione dopo cicli termici

RÉSULTAT 3 · CYCLES THERMIQUES / *RISULTATO 4 · CICLI TERMICI*

Lorsque le DEG est soumis à des cycles thermiques, l'effort dans la GM s'accumule, cycle après cycle
L'ancrage en crête est l'élément le plus sollicité, tandis que la contraction se concentre en pied.
Quando il DEG è sottoposto a cicli termici, lo sforzo nella GM si accumula, ciclo dopo ciclo
L'ancoraggio al coronamento è l'elemento più sollecitato, mentre la contrazione si concentra al piede.



Effort et déformation dans l'élément de crête : la courbe oscillante est le scénario à cycles thermiques
Sforzo e deformazione nell'elemento di coronamento : la curva oscillante è lo scenario con cicli termici

Ce que prédit le modèle
Ciò che il modello prevede

La déformation induite par le réchauffement peut ouvrir une fissure en tête d'enrochement lorsque le recouvrement glisse.
La deformazione indotta dal riscaldamento può aprire una fessura alla sommità del pietrame quando la copertura scivola.



Ce que l'on observe sur le terrain
Ciò che si osserva in campo

Une fissure le long de la crête d'une retenue d'altitude : la même signature, à l'échelle de l'ouvrage.
Una fessura lungo il coronamento di un bacino d'alta quota : la stessa firma, alla scala dell'opera.

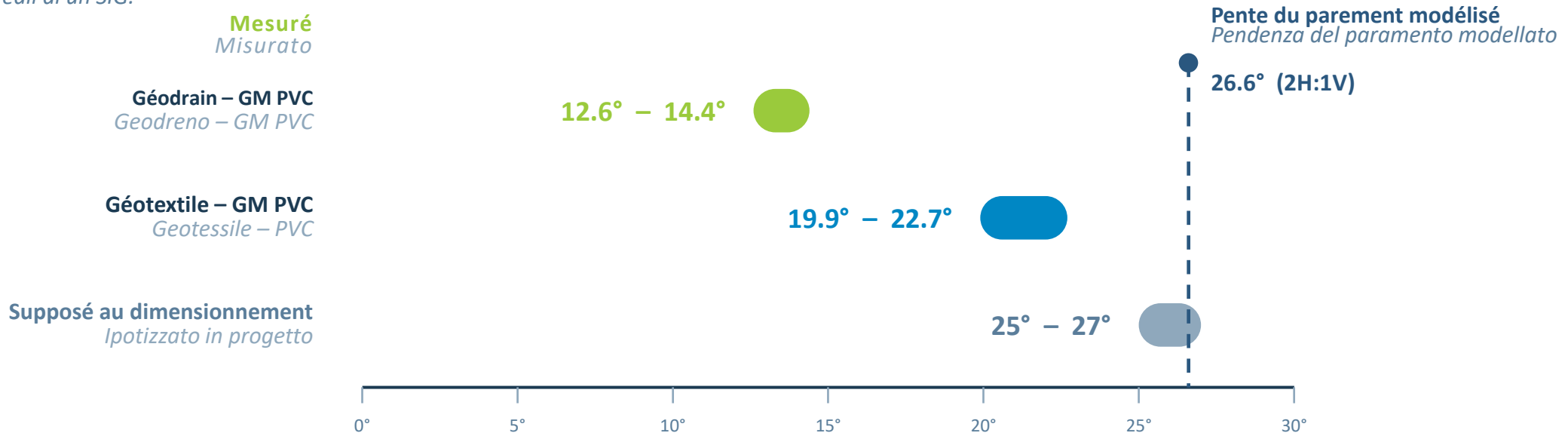
Les angles de frottement d’interfaces sont plus faibles que supposé

Gli angoli di attrito delle interfacce sono inferiori a quanto ipotizzato

RÉSULTAT 4 · BOÎTE DE CISAILLEMENT ET PLAN INCLINÉ / *RISULTATO 4 · SCATOLA DI TAGLIO E PIANO INCLINATO*

Le modèle a montré que l’interface sous la géomembrane gouverne la stabilité, mais les angles de frottement utilisés provenaient de la littérature. Ils ont depuis été mesurés, sur les produits réels d’un DEG.

Il modello ha mostrato che l’interfaccia sotto la geomembrana governa la stabilità, ma gli angoli di attrito utilizzati provenivano dalla letteratura. Ora sono stati misurati, sui prodotti reali di un SIG.



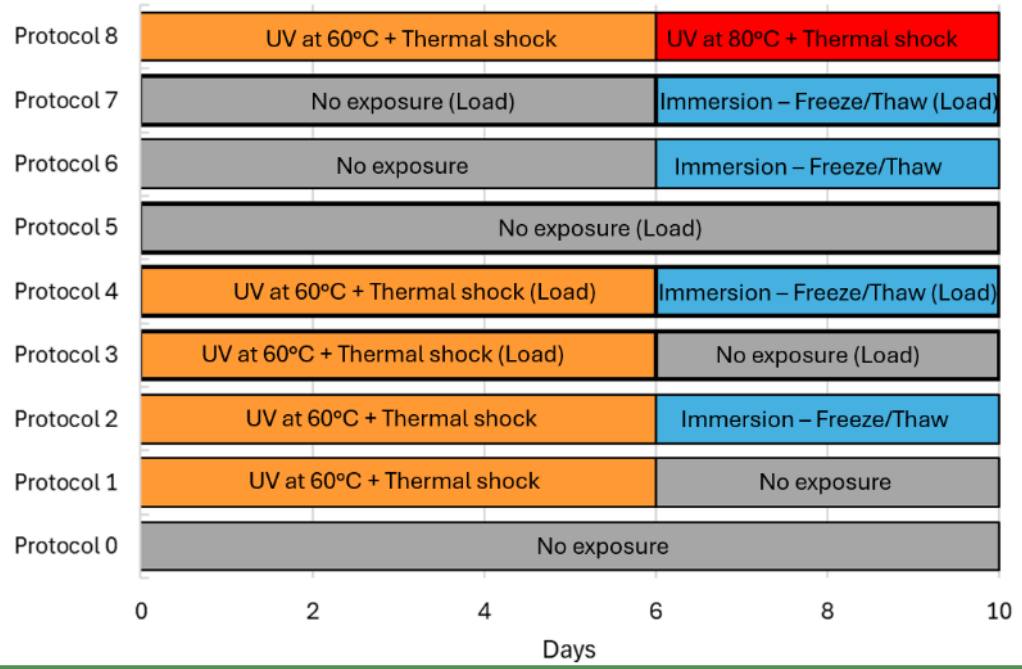
Indispensable de mesurer des résistances des interfaces. Sur ces produits, l’interface inférieure vaut environ la moitié de la valeur habituellement supposée

È indispensabile misurare le resistenze delle interfacce. In questi prodotti, l'interfaccia inferiore presenta un valore pari a circa la metà di quello solitamente ipotizzato

Les sollicitations combinées dégradent plus vite une GM PVC-P

Le sollecitazioni combinate degradano più rapidamente un PVC-P di tipo GM

RÉSULTAT 5 · Issu du vieillissement accéléré en laboratoire / *RISULTATO 5 · Derivante da invecchiamento accelerato in laboratorio*



Proportion en plastifiants après plus de 6 mois (%) *Proporzione di plastificanti dopo oltre 6 mesi (%)*
29,2
34,5
33,5
33,6
-
29,1
30,2
30,6
35,9

- Les actions combinées induisent une perte plus rapide de plastifiants : dégradation accélérée de la GM
  Le azioni combinate determinano una perdita più rapida di plastificanti: degradazione accelerata della GM
- L'étude menée montre que la GM ne devrait pas subir des efforts de traction pour éviter une dégradation prématurée
  Lo studio condotto mostra che la GM non dovrebbe essere sottoposta a sollecitazioni di trazione, al fine di evitare un deterioramento prematuro

Recommandations pour les ingénieurs

Raccomandazioni per gli ingegneri

CINQ CONSÉQUENCES PRATIQUES / *CINQUE CONSEGUENZE PRATICHE*

1	**Mesurer à vitesse lente** *Misurare a velocità lenta*	La vitesse normalisée de 100 mm/min = vitesse de contrôle de production. Considérer 0,1 mm/min ou moins pour évaluer le comportement rationnel de la GM. *La velocità normalizzata di 100 mm/min corrisponde alla velocità di controllo della produzione. Considerare 0,1 mm/min o meno per valutare il comportamento razionale della GM.*
2	**Dimensionner côté chaud** *Dimensionare sul caldo*	La rigidité est divisée par deux tous les 21 °C. C'est le côté chaud qui dimensionne et non le cas froid, où la géomembrane est plus rigide et plus résistante. *La rigidezza si dimezza ogni 21 °C. È il caso caldo a governare non quello freddo, in cui la geomembrana è più rigida e resistente.*
3	**Mesurer l'interface inférieure** *Misurare l'interfaccia inferiore*	C'est le paramètre qui gouverne la stabilité, et les valeurs mesurées peuvent valoir la moitié de celles de la littérature. *È il parametro che governa la stabilità, e i valori misurati possono valere la metà di quelli di letteratura.*
4	**Vérifier l'ancrage en crête** *Verificare l'ancoraggio al coronamento*	Les cycles thermiques y accumulent les efforts. C'est l'élément le plus sollicité du modèle, et l'endroit où apparaissent les fissures de terrain. *I cicli termici vi accumulano gli sforzi. È l'elemento più sollecitato del modello, e il punto in cui compaiono le fessure in campo.*
5	**Surveiller la couche de recouvrement** *Sorvegliare lo strato di copertura*	Un faible mouvement de l'enrochement est le signe visible d'un mouvement plus important de la géomembrane située en dessous. *Un piccolo movimento del pietrame è il segno visibile di un movimento maggiore della geomembrana sottostante.*

Production scientifique liée au WP 3.2

Produzione scientifica legata al WP 3.2

Interreg France – Italia ALCOTRA

BECCA

PUBLICATIONS · CONFÉRENCES · THÈSE / *PUBBLICAZIONI · CONFERENZE · TESI*

Impact of test speed on the thermo-mechanical behavior of various types of geomembranes

Geotextiles and Geomembranes, 53(6), 1588–1599, 2025

PUBLIÉ

Development of a thermo-mechanical model for PVC geomembrane — application to geomembrane stability on dam slopes

Applied Sciences, 16(3), 1160, 2026

PUBLIÉ

Temperature and strain-rate dependence of the secant modulus of PVC-P geomembranes

Geotextiles and Geomembranes — en cours d'évaluation

Geotextiles and Geomembranes — in valutazione

SOUMIS

Long-Term mechanical response of PVC geomembranes under combined extreme environmental conditions

Journal scientifique visé

Rivista scientifica sottoposta a revisione paritaria

EN COURS

Également présenté à

Presentato inoltre a

RUGC 2025, Marseille · Journées des doctorants INRAE, 2024, 2025 et 2026

RUGC 2025, Marsiglia · Giornate dei dottorandi INRAE, 2024, 2025 e 2026

Thèse de doctorat

Tesi di dottorato

H. Tahir, Aix-Marseille Université, ED 353 : manuscrit rédigé, soutenance début 2027

H. Tahir, Aix-Marseille Université, ED 353 : manoscritto redatto, discussione inizio 2027

Se poursuit au-delà du projet

Prosegue oltre il progetto

La relaxation de la géomembrane sous charge maintenue, et la dépendance en température du frottement d'interface.

Il rilassamento della geomembrana sotto carico mantenuto e la dipendenza dalla temperatura dell'attrito d'interfaccia.

Conférence finale / Conferenza finale — Aoste, 04.11.2026

Merci de votre attention

Grazie per l'attenzione





Guillaume.stoltz@inrae.fr · INRAE, Aix Marseille Université, UMR RECOVER

Questions et discussion / Domande e discussione

Interreg
Cofinancé par l'Union Européenne
Cofinanziato dall'Unione Europea
France – Italia ALCOTRA
BECCA